

А.С. Верещака, д-р техн. наук, Д.Н. Клауч, канд. техн. наук,  
М.Е. Кушева, канд. техн. наук, А.А. Верещака, канд. техн. наук.,  
А.А. Козлов, Д.Н. Лыткин, К.В. Крючков, Москва Россия

## **ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕЗАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В роботі розглянуті сучасні тенденції вдосконалення ріжучих інструментів з твердих сплавів. Представлені приклади підвищення їх ефективності різними технологічними методами при різанні важкооброблюваних матеріалів.*

*Ключові слова: функціональні покриття, твердосплавний інструмент, властивості і структура, ріжучі властивості, різання.*

*В работе рассмотрены современные тенденции совершенствования режущих инструментов из твердых сплавов. Представлены примеры повышения их эффективности различными технологическими методами при резании труднообрабатываемых материалов.*

*Ключевые слова: функциональные покрытия, твердосплавный инструмент, свойства и структура, режущие свойства, резание.*

*In this paper the trends of carbide cutting tools perfection are observed. Examples of their efficiency improve by various technological methods at cutting of hard-to-machining materials are presented.*

### **1. Введение**

Наиболее серьезной проблемой технологического развития современного машиностроения является необходимость обеспечения постоянного соответствия между свойствами новых конструкционных материалов подлежащих механической обработке и все более ужесточающимися условиями эксплуатации изделий из таких материалов. Чаще всего наиболее слабым звеном системы «материал - рабочая среда», определяющим допустимые условия эксплуатации и ресурс всей системы, является инструментальный материал, что предопределяет высокую значимость разработки методов и технологий модификации его свойств.

Основным инструментальным материалом при резании труднообрабатываемых материалов является твердый сплав. Несмотря на то, что за последние десятилетия ведущими производителями твердосплавного инструмента разработаны новые марки твердых сплавов для резания труднообрабатываемых материалов на основе мелко- и ультрамелкодисперсных твердых сплавов, а также сплавов с многослойно-композиционными покрытиями и связками повышенной термостойкости, однако проблема низкой эффективно-

сти твердосплавного инструмента при резании труднообрабатываемых материалов остается весьма острой. В этой связи чрезвычайно актуальным является повышение эффективности инструмента при резании труднообрабатываемых материалов путем создания твердых сплавов с более высоким уровнем физико-механических и режущих свойств.

## *2. Задачи и методика исследования*

### *2.1. Твердые сплавы со связками повышенной жаропрочности.*

С учетом особенностей механизма отказа твердосплавного инструмента при резании труднообрабатываемых материалов связанных с температурным разупрочнением кобальтовой связки, повышение режущих свойств инструмента осуществляли путем создания ультрадисперсного композиционного твердого сплава со связкой повышенной жаропрочности и наноструктурированным покрытием, имеющим многослойно-композиционную архитектуру [1-5].

Особое внимание уделяли разработке твердосплавного субстрата, от структуры и свойств которого существенно зависят не только условия формирования и свойства наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий и композиции «сплав-покрытие» в целом [1,3,5], но и способность инструмента с покрытием сопротивляться тепловым отказам. Использовали технологию приготовления исходной смеси и спекания сплава позволяющие: • эффективно тормозить коагуляцию зерен при нагреве инструмента при температурах резания; • повысить плотность и равномерность распределения компонентов сплава по объему сменной многогранной пластины (СМП); • обеспечить однородность карбидных зерен (WC, TiC, TaC) по размерам и форме [5].

Так как связка твердого сплава является слабым звеном системы «твердый сплав», а при резании труднообрабатываемых материалов одной из основных причин отказа твердосплавного инструмента является температурное разупрочнение кобальтовой связки и последующая потеря пластической прочности инструмента [1,6], то одним из основных средств улучшения свойств твердосплавного субстрата являлось легирование кобальтовой связки тугоплавкими металлами с низкими карбидообразующими свойствами. К таким металлам относится рений (Re), имеющий повышенную жаропрочность, низкую карбидообразующую способность, который был выбран основным легирующим элементов для повышения жаропрочности кобальтовой связки.

Установлено, что легирование рением, обладающего повышенной температурой плавления и рекристаллизации, высоким модулем упругости, прочностными и пластическими свойствами близкими к свойствам кобальта. Очень важным является и тот факт, что рений сохраняет высокий уровень

свойств при повышенных температурах и отвечает ряду требований, предъявляемых к легирующим добавкам - не образует устойчивых карбидов, а при взаимодействии с кобальтом образует непрерывный ряд твердых растворов.

Проведенные исследования показали [5], что введение рения в кобальтовую связку сплавов WC-Co повышает их сопротивление окислению при нагреве на воздухе до 950 °С, причем максимальную сопротивляемость окислению наблюдали у сплава ВРК15, жаростойкость которого в 2 раза превысила соответствующий параметр стандартного сплава WC-Co с эквивалентным содержанием связки. Установлено также оптимальное соотношение Re/Co в связке сплава WC-Co, что, в свою очередь, позволило получить требуемое соотношение свойств разрабатываемого твердого сплава. Наиболее перспективными в группе сплавов WC-(Co,Re) оказались марки ВРК-12, ВРК-13 и ВРК-15, содержащие 3, 6 и 9 (%.объем) рения.

Исследования прочностных свойств сплавов WC-(Co,Re) показали, что они обладают высокой твердостью и сохраняют высокую прочность при повышенных температурах. Предварительные аттестационные исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП из сплава WC-(Co,Re) показали, что такие инструменты имеют повышенное время наработки на отказ (стойкость), в 4-4,5 раза превышающее соответствующий показатель для инструмента, оснащенного СМП из сплавов ВК10-ОМ и ВК10-ХОМ, на операциях чернового и получистового точения труднообрабатываемых материалов.

## *2.2. Слоисто-композиционные инструментальные материалы*

Рассмотрены два типа слоисто-композиционных материалов на основе трехкомпонентной композиции «твердый сплав - керамика - многослойно-композиционное покрытие» (ВКК), у которой каждый из компонентов выполняет определенные функции (рис.1), а также двухкомпонентной композиции «твердый сплав-КНБ» (ТС-КНБ) (рис.2).

При разработке **ВКК** особое внимание уделяли выбору материалов керамического слоя и субстрата (твердого сплава) [7]. Такой выбор весьма ограничен вследствие необходимости соблюдения требований совместимости термомеханических характеристик соединяемых слоев (коэффициенты термического расширения, модули упругости и т.д) [7]. Прочное соединению межфазных границ слоев является одним из важнейших условий нормального функционирования инструмента из **ВКК**. При разработке **ВКК** предпочтение отдавали технологии формирования границ раздела фаз с диффузионным слоем. Для проведения детальных исследований были выбраны следующие сочетание элементов **ВКК**: субстрат (слой 1) на основе твердого сплава - WC-TaC-Co с ультрадисперсной структурой, керамический слой 2 на основе сложной композиции ( $Al_2O_3$ -AlN,  $Si_3N_4$ , TiC,  $Y_2O_3$ ) и слой 3 в виде наност-

руктурированного многослойно-композиционного покрытия (см. рис.1) на основе систем  $\text{Ti-TiN}-(\text{Ti,Al})\text{N}$ ,  $\text{Ti-TiN}-(\text{Ti,Cr,Al})\text{N}$ ;  $\text{Zr}-(\text{Zr,Cr})\text{N}-(\text{Zr,Cr,Al})\text{N}$  [6,8].

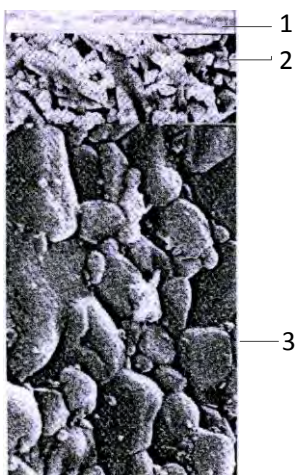


Рисунок 1 – Концептуальная схема архитектуры высокопрочной композиционной керамики (**ВКК**) с наноструктурированным многослойно-композиционным покрытием:

1- многослойно-композиционное наноструктурированное покрытие, которое обеспечивает: - «залечивание» поверхностных дефектов керамического слоя 2; - благоприятно направленную трансформацию контактных процессов; повышение сопротивляемости слоя 2 макро – и микро хрупкому разрушению; 2 – керамический слой, обеспечивающий: - повышение сопротивляемости **ВКК** термодиффузии, коррозии и высокотемпературному разрушению; - повышение твердости, теплостойкости и износостойкости **ВКК**; 3 - твердосплавный субстрат обеспечивающий: - высокую прочность в объеме геометрического тела СМП из **ВКК**; - повышение эксплуатационной надежности инструмента, оснащенного СМП из **ВКК**.

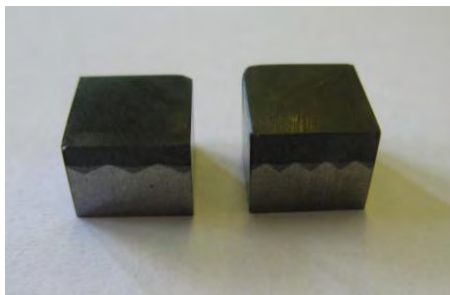


Рисунок 2 – Стандартная вставка оснащенная эльбором-Р (а) и опытные двухслойные пластины (б): 1 –слой КНБ; 2 – твердосплавный субстрат (WC-TaC-Co)-КНБ

Для формирования покрытий на СМП из ультрадисперсных твердосплавных субстратов использовали инновационные процессы фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (**ФВДО**), который является модернизированной разновидностью процесса физического осаждения покрытий, получивших наименование КИБ-MeVVA (Metal Vapor Vacuum Arc) [8].

Покрyтия наносили на СМП при использовании вакуумно-дуговой установки ВИТ-2 при оптимальном сочетании основных факторов процесса **ФВДО**.

Двухкомпонентный композит **ТС-КНБ** формировали при следующей последовательности: - предварительное спекание смеси ультрадисперсных порошков WC, TaC и Co (слой 2, рис. 2,а), - нанесение адгезионно-демпфирующего подслоя; - синтез слоя из кубического нитрида бора (слой 1, рис.2,б).

### 2.3. Методика исследований.

Объектом исследования служили СМП квадратной формы SNUN и SNUA из ультрадисперсного твердого сплава на основе карбида вольфрама с кобальто-рениевой связкой WC-(Co,Re) (сплавы **ВРК**) и наноструктурированными многослойно-композиционными функциональными покрытиями, а также из ВКК.

Для исследований различных свойств твердого сплава **ВРК** и композита **ВКК** с покрытием была изготовлена опытная партия сменных многогранных пластин (СМП) формы 03111-0363 по ГОСТ 19041 (форма SNUN по стандарту ISO 120408) без отверстия с  $r = 0,8$  мм. Для сравнения различных свойств разрабатываемых **ВКК** с покрытием со свойствами стандартных марок твердых сплавов и РК использовали также СМП из мелкозернистого твердого сплава ВК6-М, оксидной РК ВО-13 и HS2 (ФРГ), оксидно-карбидной РК ВОК-71.

Партии СМП разделяли на группы, одна из которых была использована для проведения исследований по оценке физико-механических и кристаллохимических свойств, другая - для оценки режущих свойств.

Используемые СМП из различных инструментальных материалов при закреплении в резцедержатель (ГОСТ 20872-80 и 19058-80) обеспечивали следующие значения геометрических параметров режущей части:  $\gamma = -10^0$ ;  $\alpha = 6-8^0$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^0$ ;  $\lambda = 0^0$ .

Исследования режущих свойств СМП проводили при продольном ( $D_3 = 160$  мм,  $L = 400$  мм) и поперечном ( $D_n = 350$  мм;  $D_b = 100$  мм) точении стали 45 и закаленной стали 50Г (HRC 58), вольфрама, никелевых сплавов на универсальном токарном станке 16К20 при  $v = 80-350$  м/мин;  $S = 0,1-0,25$  мм/об;  $t = 0,5-1,0$  мм.

Испытаний двухкомпонентного композита **ТС-КНБ** проводили по специальной методике.

### 3. Наноструктурированные многослойно-композиционные покрытия

В соответствии с концепцией функциональное покрытие для режущего инструмента [1,6], должно обладать многослойно-композиционной архитектурой, содержащей несколько слоев различного функционального назначения (рис.3.) : 1 - наружный износостойкий слой, непосредственно контактирующий с обрабатываемым материалом, с основной функцией по снижению физико-химической активности инструментального материала по отношению к обрабатываемому; 2 - промежуточный (переходный) слой, который может выполнять несколько различных функций, например, служить барьером тепловым потокам и диффузии между контактной областью при резании и инструментальным материалом, нивелировать разницу в кристаллохимических свойствах наружного и адгезионного слоев для поддержания высокой прочности адгезии между ними; иметь сенсорные свойства для мониторинга изменений температуры резания или уровня термомеханических напряжений возникающих на контактных площадках инструмента; 3 - адгезионный подслой обеспечивает прочную адгезию между покрытием и инструментальным материалом (см.рис.3).

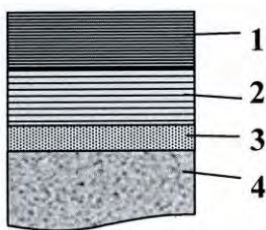


Рисунок 3 – Принципиальная схема трех-  
слойного многослойно-композиционного  
покрытия:

1- износостойкий слой с функцией снижения адгезии инструментального материала по отношению к обрабатываемому; 2 – промежуточный слой с барьерными и другими функциями; 3 - адгезионный подслой, обеспечивающий высокую прочность адгезионной связи между покрытием и твердосплавным субстратом

Для оценки состава наружного слоя необходим выбор модели изнашивания режущего инструмента. При выборе модели изнашивания твердосплавного режущего инструмента было принято допущение, что основным механизмом изнашивания твердосплавного инструмента является адгезионно-усталостный износ. В соответствии с таким подходом минимизация адгезионно-усталостного изнашивания инструмента достигается при минимуме теряемой массы инструментального материала  $Ma \rightarrow \min$ :

$$Ma = K_a \cdot \rho \cdot F_a (J \cdot \sigma_a / \sigma_p), \quad (1)$$

где  $K_a$  – коэффициент адгезии (объемный);  $\rho$  – плотность инструментального материала;  $J$  - интенсивность схватывания;  $\sigma_a$  – прочность связей в узлах схватывания;  $\sigma_p$  – сопротивляемость инструментального материала разрушению. Причем, интенсивность схватывания можно оценить, используя зависимость:

$$J = (N_T + N_M) F_a \quad (2)$$

где  $F_a$  – номинальная площадь контакта;  $N_T$ ,  $N_M$  – число активных центров на единицу площади контакта, соответственно при термическом и механическом активировании. Величину  $N_T$  можно оценить по формуле

$$N_T = \nu \cdot T \cdot e^{-Q_T/K\theta} \quad (3)$$

где  $\nu$  – частота собственных валентных колебаний атомов;  $T$  – время;  $Q_T$  – энергия термической активации;  $K$  – постоянная Больцмана;  $\theta$  – абсолютная температура. Величину  $N_M$  можно также установить при использовании следующей зависимости:

$$N_M = \rho_l \cdot S \cdot b, \quad (4)$$

где  $\rho_l$  – плотность дислокаций;  $S$  – средняя длина пробега дислокации;  $b$  – вектор Бюргерса.

Скорость движения дислокаций можно оценить по формуле:

$$V_d = S \cdot \tau^n \quad (5)$$

где  $\tau$  – напряжение;  $n$  – показатель степени, зависящий от твердости материала.

По формулам (1) – (5) оценивали степень влияния факторов, оказывающих влияние на склонность инструментального материала (материала покрытия) и обрабатываемого материала к адгезии. Эта склонность будет возрастать при следующих условиях: – при увеличении температуры (до момента начала интенсивного окисления и разупрочнения мостиков адгезии); – при увеличении частоты собственных колебаний валентных атомов, которая коррелирует со статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций (СВАСК); – при росте подвижности дислокаций  $V_d$ , которая обратно пропорциональна твердости инструментального материала (покрытия).

Термическую составляющую схватывания оценивают по температуре плавления вещества (соединения):

$$N_T = C \cdot T^{\theta/\theta_{nl}} \quad (6)$$

где  $C$  – постоянная;  $\theta$  – абсолютная температура;  $\theta_{nl}$  – температура плавления вещества.

При оптимальном составе наружного слоя многослойно-композиционного покрытия достигается соблюдение условия  $Ma \rightarrow \min$ .

Анализ зависимостей (1-6) позволяет констатировать, что при выборе материала износостойкого слоя многослойно-композиционного покрытия при принятом допущении о превалирующем влиянии адгезионно-усталостных процессов на изнашивание твердосплавного инструмента, предпочтение следует отдавать твердым тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количества СВАСКов устойчивых конфигураций типа  $sp^3$  (материалы с пре-

имущественно металлическими связями),  $s^2p^6$  (материалы со смешанными типами связи) и  $d^5$  (материалы с ковалентными и ионными связями).

Нанесение композиционно-многослойных покрытий в соответствии с разработанной концепцией производили на установке ВИТ-2, разработанной МГТУ «СТАНКИН» и научно-производственной компанией «Фирма ЭКОТЕК» [2,6]. Установка ВИТ-2 позволяет реализовывать инновационные процессы фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (**ФВДО**) для синтеза многослойно-композиционных наноструктурированных функциональных покрытий на рабочих поверхностях любых типов режущих инструментов.

На следующем этапе была проведена процедура оптимизации основных технологических параметров **ФВДО**, которые оказывают существенное влияние на свойства покрытий. К таким параметрам были отнесены - давление реакционного газа (азота)  $p_N$ , напряжение смещения  $U_C$  на инструменте (при конденсации покрытия) и ток дуги  $I_{Ti}$  при осаждении титана [6]. В качестве критериев оценки оптимальности параметров процесс синтеза покрытия были выбраны: стойкость инструмента  $T$  (время наработки инструмента на отказ), оснащенного сменными многогранными пластинами (СМП) при предельном значении фаски износа задней поверхности твердосплавной  $h_3$ .

Информацию об управляющих воздействиях изображали в виде многофакторного плана эксперимента. План состоял из совокупности всех возможных комбинаций управляющих факторов процесса осаждения покрытий  $I, p$  и  $U$ , которые одновременно варьировали на двух или более уровнях.

Математическая модель, устанавливающая связи между наиболее значимыми параметрами вакуумно-дугового процесса  $I, p, U$  и стойкостью инструмента  $T$ , оснащенного СМП из ВРК-13 с покрытием Ti-TiN-TiAlN применительно к продольному точению стали 45 НВ 200 с  $t=1,0$  мм;  $S=0,3$  мм/об и  $v=150$  м/мин имеет следующий вид:

$$T = 2,39 \cdot I_{Ti}^{-8,60} \cdot p_N^{-3,29} \cdot U_C^{-0,33} \exp(8,26 \cdot 10^{-2} I_{Ti} + 13,7 p_N + 7,88 \cdot 10^{-3} U_C) \quad (7)$$

где  $T$  – стойкость инструмента, мин.

Зависимость (7) была использована как целевая функция для процедуры оптимизации параметров процесса синтеза износостойкого слоя многослойно-композиционного покрытия Ti-TiN-(Ti,Al)N. Аналогичная методика оптимизации параметров синтеза проведена при получении покрытий других составов, например Zr-ZrN-(Zr,Cr)N, Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N.

Исследовали основные параметры покрытий – микротвердость, толщину, прочность адгезии системы «покрытие-субстрат», морфологию поверхности, а также контролировали состав композиционного слоя (Ti,Cr,Al) [6].



В табл. 1 показаны основные параметры слоев и субслоев многослойно-композиционного покрытия, а на рис. 4 и 5 морфология поверхности и структура поверхностного слоя 1 (см. рис 3).

Анализ данных в таблицы 1 и рис 4, 5 позволяет отметить следующее.

Износостойкий слой (Ti,Cr,Al)N имеет супермногослойную архитектуру с толщиной субслоев порядка 15-25 нм. Среднее значение содержания Ti, Cr и Al в (Ti,Cr,Al)N-слое составило соответственно 0,35:0,35:0,30. (Ti,Cr,Al)N-слой имеет столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно плоскости подслоя (2) (Ti,Cr)N. Толщина субслоев промежуточного TiN-слоя также составляет порядка 25 нм, что позволяет классифицировать многослойно-композиционное покрытие как наноструктурированное [6,8].

Таблица 1 – Архитектура и параметры износостойкого комплекса на основе системы Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N

Архитектура элементов многослойно-композиционного покрытия Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N	Состав, %, толщина	Микротвердость*	Прочность адгезии**, $P_{\text{крит}}$ , Н
Адгезионный подслой Ti (монослойный)	$h_a = 0,1$ мкм	-	-
Износостойкий слой TiAlN (многослойный)	50%Ti-50%Al; $h_u = 2,0$ мкм $h_c = 25$ нм	3200	120
Промежуточный слой TiN (многослойный)	$h_n = 1,8$ мкм $h_c = 15$ нм	-	-

$h_a$  – толщина адгезионного подслоя;  $h_u, h_n$  – толщина износостойкого и промежуточного слоев;  $h_c$  – толщина субслоев износостойкого и промежуточного слоев; \* - значение микротвердости получено на наноиндентометре с поверхности образца; \*\* -  $P_{\text{крит}}$  – критическое значению усилия, прилагаемого к скрайбирующему (царапывающему) индентору, при котором происходит разрушение покрытия вдоль царапины.

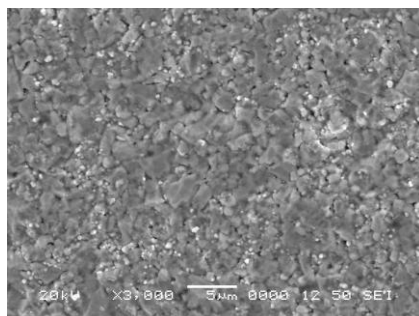
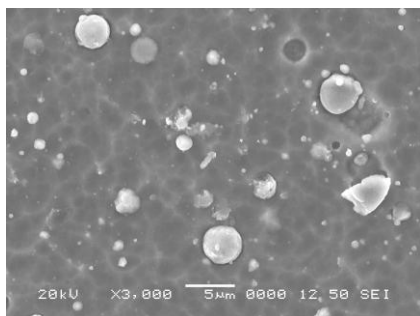


Рисунок 4 – Морфология поверхностного износостойкого слоя (1) (Ti,Cr,Al)N многослойно-композиционного покрытия Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N, получено при использовании параметров осаждения  $U_C = 130$  В,  $p_N = 0,28$  Па и  $I_{TГ} = 90$  А:

а – покрытие полученное при использовании стандартной технологии КИБ-МеVVA; б – покрытие, полученное при использовании процесса ФВДО.

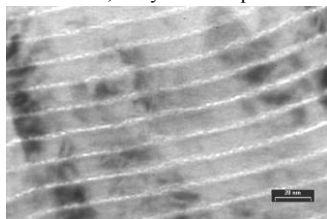


Рисунок 5 – Структура поверхностного износостойкого слоя (1) (Ti,Cr,Al)N многослойно-композиционного покрытия Ti - (Ti,Cr)N - (Ti,Cr,Al)N

#### 4. Исследование режущих свойств инструмента, оснащенного СМП с разработанными покрытиями

##### 4.1. Режущие свойства пластин ВРК

Проведенные исследования по выбору оптимальных свойств твердого сплава WC-(Co,Re), обеспечивающих максимальную эффективность функционирования покрытия, позволили установить оптимальное соотношение между параметрами твердосплавного субстрата и покрытия. Таким образом, в качестве субстрата с оптимальными свойствами был выбран сплав ВРК-13, имеющий более высокую прочности при изгибе по сравнению со сплавом ВРК-15. На партию СМП из этого сплав было нанесено многослойно-композиционные покрытия различного состава при использовании технологии **ФВДО** на установке ВИТ-2.

Исследования режущих свойств СМП из различных твердых сплавов проведены при продольном и поперечном точении стали 45 ( $c_t = 1,0$  мм;  $S = 0,3$  мм/об;  $v = 35-270$  м/мин) и сплава ХН77ТЮР ( $c_t = 1,0$  мм;  $S = 0,15$  мм/об;  $v = 35-50$  м/мин). Сравнение режущих свойств СМП из (ВРК-13) - Ti-TiN-

(Ti,Cr,Al)N производили с соответствующим параметром СМП из (BK10-ХОМ) - Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N, что было обусловлено широким применением сплава BK10-ХОМ для обработки резанием труднообрабатываемым материалов. Критерием износа служило предельное значение фаски изнашивания задней поверхности  $h_3=0,4-0,5$  мм, по которому определяли время наработки инструмента на отказ (стойкость)  $T$ .

На рис. 6 и 7 приведена соответствующе зависимость износа задней поверхности  $h_3$  СМП из ВРК13 от времени резания при точении стали сплава ХН77ТЮР.

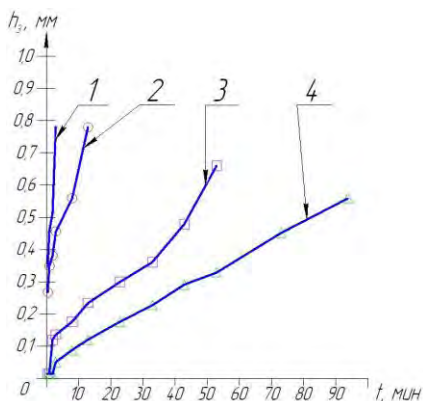


Рисунок 6 – Зависимость износа задней поверхности  $h_3$  твердосплавных СМП от времени резания при точении стали 45 с  $t = 1,0$  мм;  $S = 0,3$  мм/об;  $v = 150$  м/мин:  
1-BK10-ХОМ; 2-ВРК-13; 3-(BK10-ХОМ)-Ti-TiN-(Ti,Al)N  
4-(ВРК-13)-Ti-TiN-(Ti,Al)N

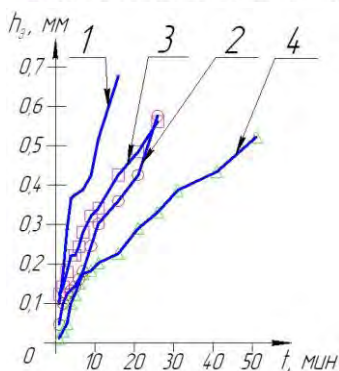


Рисунок 7 – Зависимость износа задней поверхности  $h_3$  твердосплавных СМП от времени резания при точении сплава ХН77ТЮР с  $t=1,0$  мм;  $S=0,15$  мм/об;  $v= 50$  м/мин:  
1-BK10ХОМ; 2-ВРК-13; 3-(BK10-ХОМ)-Ti-TiN-(Ti,Al)N; 4-(ВРК-13)-Ti-TiN-(Ti,Al)N

Анализ кинетики изнашивания твердосплавных СМП в зависимости от времени резания, представленных на рис.6 и 7 позволяет отметить следующее.

1. Лучшие результаты при точении стали 45 обеспечивали резцы, оснащенные пластинами ВРК-13 с композиционно-многослойным покрытием Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N, которые существенно превосходили стойкость контрольных

пластин ВРК-13 и ВК10-ХОМ без покрытия, в 1,9 раза превосходили стойкость пластин (ВК10-ХОМ) -  $\text{Ti}-(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Al})\text{N}-\text{TiN}$  в исследованном диапазоне условий обработки.

2. При точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР резцы, оснащенные пластинами (ВРК-13)- $\text{Ti}-\text{TiN}-(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Al})\text{N}$ , имели стойкость в 2,2 раза выше стойкости контрольных пластин (ВК10-ХОМ)- $\text{Ti}-\text{TiN}-(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Al})\text{N}$  и более чем в 4 раза стойкость контрольных пластин ВК10-ХОМ без покрытия.

3. Изнашивание СМП (ВРК-13)- $\text{Ti}-\text{TiN}-(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Al})\text{N}$  характеризовалось практически полным отсутствием пластического изменения формы режущей части СМП, отсутствием трещинообразования в покрытиях и сохранением покрытий на контактных площадках СМП практически до критического значения фаски износа задней поверхности.

Таким образом, сплавы ВРК-13 [ $\text{WC}-(\text{Co}, \text{Re})$ ] с наноструктурированным покрытием  $\text{Ti}-\text{TiN}-(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Al})\text{N}$  существенно превосходят сплавы ВК10-ХОМ при точении сплава ХН77ТЮР не только по износостойкости, но и по возможности лучше сопротивляться пластическому изменению формы режущей части СМП, что объясняет большую долговечность работы покрытия на контактных площадках передней и задней поверхностей СМП и позволяет констатировать большую продолжительность сохранения положительных эффектов покрытий.

*4.2. Режущие свойства инструмента, оснащенного СМП из слоистых композитов ВКК.*

Результаты исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП из различных инструментальных материалов и разрабатываемой ВКК при поперечном точении заготовок из стали 45 в (HRC 42-45) представлены в таблице 2.

Как видно из представленных данных наиболее высокие режущие свойства при точении с переменной скоростью резания (поперечное точение) обеспечивали СМП из ВКК с наноструктурированным покрытием при сухом резании ( $K_{\text{ст}} = 9,78$ ) по сравнению с инструментом из стандартных типов керамики (ВО-13, ВОК-71, НС2) и твердого сплава (ВК6-М) и особенно при резании с подачей ИГС ( $K_{\text{ст}} = 11,7$ ), в том числе и по сравнению с инструментом из твердого сплава ВК6-М с наноструктурированным покрытием при подаче в зону обработки ИГС (см. табл.4).

Инструменты, оснащенные СМП из **ВКК** с наноструктурированным покрытием обеспечивали существенное повышение стойкости (более 2-х раз) по отношению к стойкости СМП из **ВКК** без покрытия не только при использовании системы с подачей ИГС, но и при сухом резании (см. табл 2).

Таблица 2 – Результаты сравнительных исследований режущих свойств ВКК

Инструментальный материал	Показатели режущих свойств различных СМП при $h_3=0,25$ мм с $v$ от 270 до 80 м/мин; $S=0,1$ мм/об; $t=0,5$ мм.	
	Время резания, мин	Коэффициент стойкости $K_{ст}$
ВК6-М	1,22	1
ВК6-М*	1,24	1,03
ВК6-М-[Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N*]	2,8	2,3
ВО-13	2,8	2,3
ВОК-71	2,6	2,13
НС2 (РК, ФРГ)	4,5	3,69
<i>ВКК</i>	5,3	4,34
<i>ВКК</i> -Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N	8,0	9,78
<i>ВКК</i> -Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N*	9,6	11,7

\*- исследования при подаче в зону обработки ионизированной газовой среды (ИГС).

Проведены также исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП из **ВКК** при продольном точении закаленной стали 50Г (HRC 58), результаты которых представлены на рис.8.

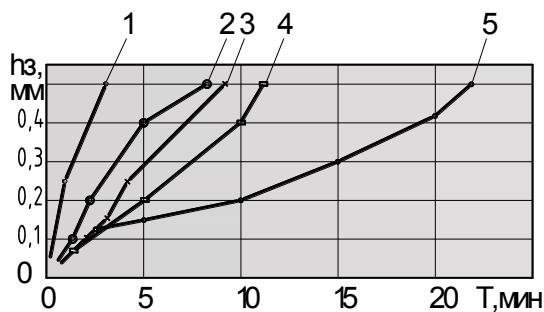


Рисунок 8 – Зависимость величины фаски износа задней поверхности инструмента  $h_3$ , оснащенного СМП из различных инструментальных материалов, от времени резания  $T$  при различных условиях продольного точения стали 50 Г (HRC 58) с  $v=340$  м/мин;  $S=0,15$  мм/об;  $t=0,5$  мм:

- 1- СМП из ВК6-М при сухой обработке; 2 - СМП из ВК6-М – Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании ИГС; 3- СМП из ВОК-71 при сухой обработке; 4 - СМП из **ВКК** при сухой обработке; 5 – **ВКК**- Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании ИГС.

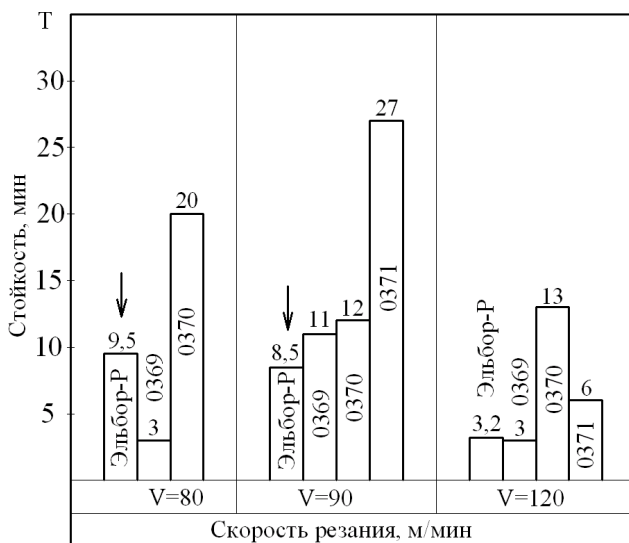


Рисунок 9 – Влияние скорости резания на стойкость пластин «ТС-КНБ» при точении стали P12 HRC 63 с  $S = 0,07$  мм/об;  $t = 0,2$  мм

#### 4.3. Режущие свойства двухкомпонентного композита «твердый сплав - КНБ»

Исследования проводили при обработке заготовок из вольфрама ( $D=65$  мм,  $L=200$  мм) и термообработанной быстрорежущей стали P12 с твердостью HRC 63 ( $D = 85, 300$  мм) при  $v = 60 - 120$  м/мин,  $S = 0,07$  мм/об,  $t = 0,2$  мм.

Результаты исследований представлены на рис.9.

Анализ результатов исследований режущих свойств опытных четырехгранных пластин 0369, 0370, 0371 из «ТС-КНБ» при продольном точении закаленной стали P9 HRC 63 позволил установить следующее:

- при точении инструментом, оснащенным стандартными пластинами «Эльбор-Р» изнашивание задней поверхности сопровождалось хрупкими сколами и выкрашиванием режущей кромки, наблюдались периодически возникающие вибрации;
- отмечено, что при износе  $h_3$  более  $0,2$  мм пластин «Эльбор-Р» резко увеличивается шероховатость обработанной поверхности;
- установлено, что процесс резания при использовании инструмента, оснащенного опытными пластинами ТС-КНБ (0369, 0370, 0371), осуществлялся достаточно стабильно, без заметных вибраций, сколов и выкрашиваний режущей части пластин не обнаружено.

Эксперименты по оценке режущих свойств опытных пластин ТС-КНБ при точении вольфрама в сравнении с режущими свойствами стандартных пластин «Эльбор-Р» с  $V = 18$  и  $35$  м/мин;  $S = 0,07$  мм/об;  $t = 0,2$  мм показали, что при предельном износе  $h_3=0,3$  мм:

- стойкость инструмента, оснащенного пластинами Эльбор-Р, соответственно составила 8,5 мин и 1-1,2 мин;
- стойкость инструмента, оснащенного опытными пластинами *ТС-КНБ* (0371) соответственно составила 0,7 – 0,8 мин и 0,3-0,4 мин.

Таким образом, опытные пластины из двухслойного композита *ТС-КНБ* по режущим свойствам существенно превосходили соответствующие свойства стандартных пластин «Эльбор-Р».

### *Заключение*

В работе показана возможность повышения эффективности резания труднообрабатываемых материалов путем применения инновационных инструментальных материалов слоисто-композиционного типа с наноразмерными многослойно-композиционными покрытиями и твердых сплавов имеющих жаропрочную кобальт-рениевую связку и композиционно-многослойным покрытие с нанодисперсной структурой. Эффект повышения стойкости достигался за счет лучшей сопротивляемости кобальт-рениевого твердого сплава термомеханическому разрушению и изнашиванию при повышенных температурах.

Среди существующих принципов создания функциональных покрытий различного назначения наиболее перспективной является концепция многослойной архитектуры, так как подобные покрытия способны удовлетворять гамме противоречивых требований к инструментальному материалу, в частности обеспечивают максимальное снижение интенсивности изнашивания инструмента в различных условиях обработки при одновременном снижении термомеханических напряжений приводящих к такому изнашиванию.

Для синтеза покрытий использован процесс *фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (ФВДО)* и опытная технология на его основе для эффективной подготовки поверхности и нанесения наноструктурированных покрытий многослойной сложно-композиционной архитектуры на твердые сплавы WC-(Co,Re). Разработаны математические модели процесса *ФВДО*, позволяющие оптимизировать численные значения основных параметров технологии осаждения - давление рабочего газа, величины катодного тока и напряжения смещения.

**Список использованных источников:** 1. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием – М.; Машиностроение, 1993. С.368. 2. *Верещака А.С.* Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущих инструментов. В кн. «Современные технологии в машиностроении», - Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. С. 210-231. 3. Исследование структуры и свойств твердых сплавов на основе карбида вольфрама со связкой, содержащей рений, испытания сплавов в производственных условиях (отчет), тема №19-76-044, ВНИИТС, *Чапорова И.Н., Кудряцева Н.А.*, Москва, 1979. 4. *Иютина И.А., Куприна В.В., Соколовская Е.М., Спасов И.А.* Исследование и применение сплавов рения – сборник, М., 1975. 5. *Фальковский В.А.* Твердые сплавы. /В.А.Фальковский, Л.И.Клячко //Издательский дом «Руда и металлы», 2005. 416 с. 6. *Верещака А.С., Верещака А.А.* Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий. - М.: Упрочняющая технология и покрытия. № 9, 2005. С.9-18. 7. Верещака А.А. и др. Патент РФ № 2198243. Многослойно-композиционное износостойкое покрытие. 10.02. 2003 с приоритетом от 05.08.1998. 8. *Panckow, A.N.* Application of novel vacuum-arc ion-plating technologies for the design of advanced wear resistant coatings. /A.N. Panckow, J. Steffenhagen, D. Wegener, L. Dubner, F. Lierath. //Surface and Coating Technologies 138 (2001). - P. 71-76.

*Поступила в редколлегию 15.06.2012*